

УДК 535.8:621.373.8

О нижней частоте импульсов генерации твердотельного лазера с диодной накачкой и пассивным модулятором в резонаторе

А. Ф. Шаталов, Ф. А. Шаталов

Исследовано ограничение снизу частоты импульсов генерации твердотельного лазера с диодной накачкой и пассивным модулятором в резонаторе, обусловленное джиттером периода следования импульсов. Показано, что нижнюю частоту импульсов генерации можно выразить через параметры джиттера и коэффициент, зависящий от требований к стабильности этой частоты.

PACS: 42.55.Xi; 42.55.Rz; 42.60.Gd

Ключевые слова: твердотельные лазеры, диодная накачка, пассивная модуляция добротности.

Введение

Твердотельные лазеры (ТТЛ) с диодной накачкой и пассивным модулятором (ПМ) в резонаторе перспективны для применения в различных областях науки и техники, так как отличаются высокой надежностью, компактностью и экономичностью, а также простотой устройства и эксплуатации. При использовании таких лазеров в дистанционных датчиках, задающих генераторах, когерентных оптических радарах, дальномерах и системах синхронизации к стабильности частоты F следования импульсов генерации ТТЛ предъявляются повышенные требования [1, 2]. Одной из причин, определяющих стабильность и нижнее значение частоты F лазера, является джиттер σ_T периода $T = 1/F$ импульсов генерации ТТЛ [3, 4].

В настоящей работе исследуется ограничение снизу частоты F импульсов генерации ТТЛ с диодной накачкой и ПМ в резонаторе, обусловленное джиттером σ_T лазера.

Оценка нижней частоты

Джиттер σ_T периода T импульсов генерации ТТЛ с диодной накачкой и пассивным модулятором в резонаторе зависит от частоты F импульсов

$$\sigma_T = \frac{A}{F^\gamma}, \quad (1)$$

где A и γ — параметры джиттера [4].

Для ТТЛ на кристаллах $Y_3Al_5O_{12}:Nd^{3+}$ (YAG:Nd) и $Ca_3Ga_2Ge_3O_{12}:Nd^{3+}$ (CGGG:Nd) с пассивным модулятором (ПМ) на кристалле YAG:Cr⁴⁺ измеренные значения параметра A составляли 180—200 мкс·кГц ^{γ} , а $\gamma = 1,3—1,4$ [4].

Измерения проводили в приближении, что джиттер носит гауссов характер, σ_T^2 — дисперсия джиттера, σ_T — среднеквадратичное отклонение [4].

Исходя из (1), оценку относительной стабильности (или, что то же самое, относительной нестабильности) частоты F можно проводить по формуле

$$f = \frac{\sigma_F}{F} = \frac{\sigma_T}{T} = \frac{A}{F^{\gamma-1}},$$

где $\sigma_F = \sigma_T/T^2 = \sigma_T \cdot F^2$.

Зависимость (1) джиттера σ_T от частоты F хорошо аппроксимирует и другие известные экспериментальные результаты для джиттера ТТЛ аналогичного типа.

На рис. 1 показана зависимость ширины $4 \cdot \sigma_T$ -разброса периода T импульсов генерации от частоты F ТТЛ на активированном ионами неодима Nd^{3+} иттрий-ванадиевом кристалле $YVO_4:Nd^{3+}$ [3]. В качестве ПМ у этого лазера служило зеркало на основе полупроводникового насыщающегося поглотителя [3]. Экспериментальные результаты [3] хорошо аппроксимируются зависимостью (1) при $A = 50$ мкс·кГц^{1,4} и $\gamma = 1,4$. Меньшее значение параметра A может быть связано с меньшими флуктуациями мощности накачки лазера.

Так как период T зависит от мощности накачки, порога генерации и плотности инверсной населенности активного элемента (АЭ) в конце генерации ТТЛ [5], то, соответственно, и джиттер σ_T будет в общем случае зависеть от флуктуаций мощности накачки, порога генерации и плотности инверсной населенности АЭ в конце генерации лазера.

Шаталов Андрей Федорович, научный сотрудник.

Шаталов Федор Андреевич, доцент.

Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (МИРЭА) (Технический университет).

Россия, 119454, Москва, пр. Вернадского, 78.

Тел. 8(903) 268-92-62, 8(945) 434-76-74.

E-mail: afshatalov@yahoo.co.uk

Статья поступила в редакцию 19 июня 2009 г.

© Шаталов А. Ф., Шаталов Ф. А., 2010

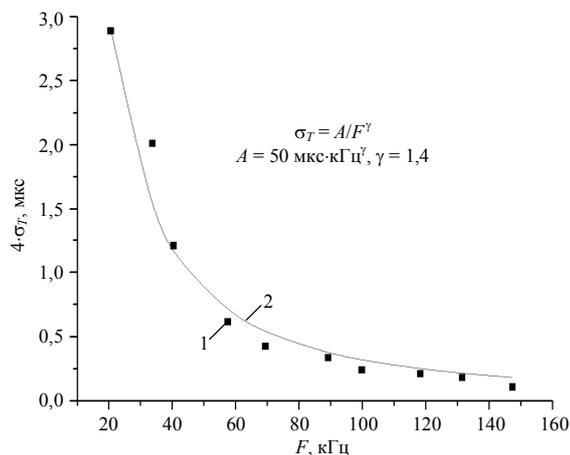


Рис. 1. Зависимость ширины $4\sigma_T$ -разброса периода T импульсов генерации от частоты F импульсов: 1 — эксперимент [3]; 2 — зависимость $4\sigma_T = 4\cdot A/F^\gamma$

Ширина $4\sigma_T$ -разброса периода T импульсов генерации означает, что временное расстояние между двумя соседними импульсами генерации лазера лежит в интервале $[T-2\sigma_T, T+2\sigma_T]$ с вероятностью 0,955 [6]. Выбор ширины разброса периода импульсов генерации зависит от количества регистрируемых импульсов (или времени их накопления), характеристик процесса (джиттера) и требуемой вероятности (достоверности). Если джиттер носит гауссов характер, то ширина разброса периода импульсов, равная $2\cdot m\sigma_T$, где $m = 1, 2, 3$ и т. д., будет соответствовать вероятности 0,683; 0,955; 0,997 и т. д. [6] нахождения периода в интервале $[T-2m\sigma_T, T+2m\sigma_T]$. Для многих практических задач требование нахождения периода в доверительном интервале $[T-K/2\sigma_T, T+K/2\sigma_T]$ с вероятностью 0,995—0,997, где $K = 4-6$, является достаточным. В этом случае оценку нижней частоты F_i можно проводить из условия, что при $F = F_i$ ширина $K\cdot\sigma_T$ разброса периода импульсов генерации равна периоду $T_i = 1/F_i$. Из этого условия получим формулу для нижней частоты F_i импульсов генерации ТТЛ

$$F_i = K^{1/(\gamma-1)} \cdot A^{1/(\gamma-1)} = K^{1/(\gamma-1)} F_L, \quad (2)$$

где $F_L = A^{1/(\gamma-1)}$ — предельная нижняя частота [4], оценка которой проводится из условия $\sigma_T = T_L = 1/F_L$ [4].

Очевидно, что коэффициент K зависит от характера джиттера, требований конкретной задачи и принятой методики измерений. В нашем случае при $F = F_i$ относительная стабильность частоты F_i зависит от коэффициента K как $f = \frac{\sigma_T}{T_i} = \frac{1}{K}$ и составляет величину, незначительно меньшую единицы. Это означает слабовыраженную периодичность импульсной генерации ТТЛ на частоте F_i .

Эксперимент

Схема экспериментальной установки для исследования ограничения снизу частоты F импульсов генерации ТТЛ с диодной накачкой и ПМ в резонаторе, обусловленное джиттером σ_T -лазера, показана на рис. 2. Источником накачки лазера служил лазерный диод 1 с волоконным выходом 2 ($NA = 0,22, r_c = 50$ мкм), с длиной волны излучения накачки $\lambda_p = 805$ нм и шириной спектра излучения накачки $\Delta\lambda \approx 2$ нм. С выходного торца волокна излучение накачки фокусировалось микрообъективом на активный элемент (АЭ) в пятно радиусом 45 мкм. В качестве АЭ использовались кристаллы YAG:Nd толщиной 4,1 мм с концентрацией ионов $Nd^{3+} 0,8\cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ и CGGG:Nd с толщиной 1,5 мм с концентрацией $Nd^{3+} 2,0\cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. При таком выборе толщин и концентраций поглощение излучения накачки в обоих АЭ было одинаковым и составляло $\sim 80\%$. Передняя грань АЭ (изображена на рис. 2 зачерненным прямоугольником) служила входным зеркалом, а сферическое зеркало (радиус $R = 5$ см, коэффициент пропускания $T = 0,01$) — выходным зеркалом резонатора лазера. Помещенный в резонатор ПМ (или насыщающийся поглотитель 5) был выполнен на кристалле YAG:Cr⁴⁺. Пассивный модулятор был просветлен на длине волны 1,06 мкм и имел при малых интенсивностях падающего на него излучения коэффициент пропускания $T = 0,9$. Толщина ПМ равнялась 1 мм.

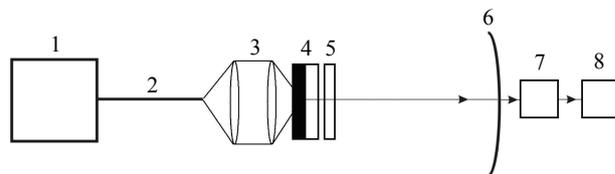


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 — лазерный диод; 2 — оптическое волокно; 3 — микрообъектив; 4 — активный элемент; 5 — пассивный модулятор; 6 — выходное сферическое зеркало; 7 — фотоприемник; 8 — осциллограф

Временные параметры импульсов генерации ТТЛ измеряли с помощью малошумящего широкополосного фотоприемника и осциллографа. Длительность, энергия и пиковая мощность регистрируемых импульсов составляли 15 нс, 2,1 мкДж и 0,14 кВт для YAG:Nd-лазера и 11 нс, 3,5 мкДж и 0,32 кВт, соответственно, для CGGG:Nd-лазера. Аналогично [4] джиттер σ_T измерялся равным четвертой части ширины $4\sigma_T$ -разброса периода импульсов генерации ТТЛ на экране осциллографа (число регистрируемых импульсов составляло 10^4). Нижняя частота F_i импульсов генерации ТТЛ определялась, когда ширина разброса периода им-

пульсов генерации лазера была приблизительно равна периоду импульсов. Практически это соответствовало генерации ТТЛ вблизи порога. На рис. 3 показан вид импульсов генерации.

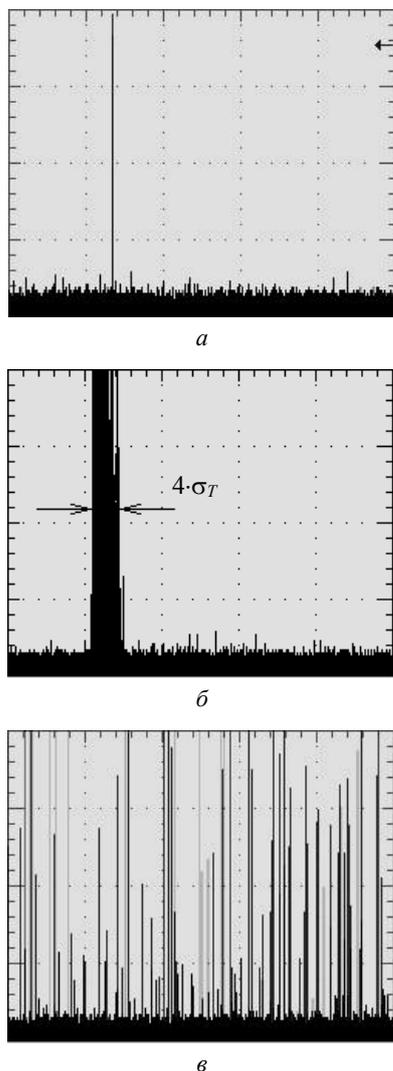


Рис. 3. Вид импульсов генерации лазера:
a — одиночный импульс; *б* — ширина $4\cdot\sigma_T$ -разброса периода импульсов генерации при джиттере σ_T ; *в* — разброс периода импульсов вблизи порога генерации лазера

Измеренные по такой методике значения нижней частоты F_i ТТЛ составляли 1—2 кГц. Нижняя частота F_i , полученная для ТТЛ по формуле (2), также составляет несколько килогерц. Полученные результаты для нижней частоты F_i согласуются по порядку величины с результатами из-

мерения пороговых характеристик YAG:Nd- и CGGG:Nd-лазеров работы [7].

Заключение

Экспериментальные результаты для джиттера σ_T периода T импульсов генерации твердотельных лазеров с диодной накачкой и пассивным модулятором в резонаторе хорошо аппроксимируются зависимостью $\sigma_T = A/F^\gamma$, где F — частота импульсов генерации лазера ($T = 1/F$), а A и γ — параметры джиттера. Параметр A изменяется в пределах 50—200 мкс·кГц $^\gamma$, а $\gamma = 1,3—1,4$.

Обусловленные джиттером нижняя частота F_i импульсов генерации ТТЛ определяется параметрами джиттера и коэффициентом, зависящим от требований к стабильности этой частоты. Полученная формула (2) для оценки нижней частоты и проведенные эксперименты по отработке методики ее измерения представляют интерес при разработке и оптимизации ТТЛ с высокой стабильностью частоты импульсов генерации.

Авторы благодарят Л. Д. Алексеевского, В. В. Беликова и В. А. Лебедева за обсуждение результатов работы.

Работа поддержана грантами РФФИ 07-02-01488-а, Рособразования 2.1.1/473 и государственным контрактом № 5622р/8061.

Литература

1. Lai N. D., Brunel M., Bretenaker F., Floch A. // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 79. No. 8. P. 1073.
2. Шаталов А. Ф., Беловолов М. И.: Тр. Всерос. науч. конф. "Лазеры. Измерения. Информация-2008", 3—5 июня, 2008. — СПб/ Под ред. В. Е. Привалова. С. 74, 75.
3. Nodop D., Limpert J., Hohmuth R., Richter W., Guina M., Tünnermann A. // Optics Lett. 2007. V. 32. No. 15. P. 2115.
4. Беловолов М. И., Шаталов А. Ф. // Квантовая электроника. 2008. Т. 38. № 10. С. 933.
5. Шаталов А. Ф., Шаталов Ф. А. // Оптика и спектроскопия. 2009. Т. 107. № 2. С. 315.
6. Худсон Д. Статистика для физиков. — М.: Мир, 1967. — 242 с.
7. Шаталов А. Ф., Шаталов Ф. А. // ПТЭ. 2009. № 6 (в печати).

About the lowest pulse repetition rates of diode-pumped passively Q-switched solid-state laser

A. F. Shatalov, F. A. Shatalov

Moscow State Institute of Radioengineering, Electronics and Automation
(Technical University), 78 Vernadsky av., Moscow, 119454, Russia
E-mail: afshatalov@yahoo.co.uk

Lowest pulse repetition rates limitation as a consequence of pulse interval jitter has been investigated. It is shown, that lowest pulse repetition rates is defined by jitter parameters and coefficient depending on stability of this repetition rates.

PACS: 42.55.Xi, 42.55.Rz, 42.60.Gd

Keywords: solid-state lasers, diode pumping, passive Q-switching.

Bibliography — 7 references.

Received 19 June 2009